

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：惑星間航行システム開発に向けたマルチスケール粒子シミュレーション
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):  
研究代表者  
白井 英之 (神戸大学大学院システム情報学研究科 教授)  
主たる共同研究者  
山川 宏 (京大大学生存圏研究所 教授)(~平成 22 年 3 月)  
篠原 育 ((独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 准教授)

### 3. 研究実施概要

惑星間宇宙航行システムとして宇宙航空研究開発機構(JAXA)で提案されている磁気プラズマセル(MPS)では、衛星搭載コイル電流により人工ダイポール磁場を形成し、それをプラズマ噴射によって広範囲に展開させて太陽風プラズマを受け止めることにより推力を得る。本研究では、MPSにおける小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用およびそれによって衛星が得る推力を定量的に評価するためにプラズマ粒子モデルシミュレーション解析を行うとともに、局所的に空間分解能を上げるために適合格子細分化法(AMR)を用いたマルチスケール粒子シミュレーション手法の新規開発を行った。

MPSが用いるダイポール磁場の規模は太陽風イオン慣性長より小さいため、プラズマを電磁流体近似したモデルでは不十分であり、磁場についての旋回運動などプラズマ運動論効果を考慮した解析が必要である。また、太陽風と磁場構造の相互作用という広範囲な現象が局所的に存在する衛星に対して与える推力の評価を高精度に行う上で、マルチスケール性の考慮も重要である。そこで本研究では、神戸大チームがプラズマ運動論効果とマルチスケール性を同時に取り入れた新しいプラズマ粒子シミュレーションを手法の開発を行い、同時にMPSと太陽風プラズマの相互作用の粒子モデルシミュレーションも担当した。またJAXAチームでは、地上チャンバー実験および数値シミュレーションを用いて、MPSを宇宙推進システムとして工学的観点から評価した。本研究ではこのような役割分担の元、神戸大チームとJAXAチームが密に協力し連絡しあいながら研究を推進した。

まずMPSの工学的解析を担当したJAXAチームでは、粒子モデルシミュレーションおよび定常解析手法とした開発したFlux-Tube法(イオン粒子、電子流体)を用いた解析により、衛星搭載コイル電流による磁場帆と太陽風プラズマの相互作用によって発生する推力値を、磁場帆スケールが数100m~数100kmの広範囲領域において初めて定量的に取得した。磁場構造が電子スケールに近づくと、プラズマの有限ラーマ半径効果により推力は低下し、その値は人工磁場をつくる磁気モーメントに比例することも明らかにした。また、イオン慣性長スケールの磁場帆の場合についても、推力値の定式化を行った。さらに、JAXA地上実験に関しては、チャンバー内の残留中性粒子の影響を考慮した粒子シミュレーションによる評価を行い、両者の一致を得た。MPS推力増加のためには衛星起源の磁場帆を出来るだけ拡大する必要があり、衛星からのプラズマ噴射による磁場帆展開およびそれによる推力増加に関する粒子シミュレーションを実施した。磁場帆スケールにもよるが、プラズマ噴射による磁場帆拡大が確認され、プラズマ噴射なしの場合に比べて数倍から10倍程度の推力増加が確認できた。これらのシミュレーション解析結果は、JAXAでの小型MPSシステム開発において重要な基礎データとなる。

一方、神戸チームでは、磁場帆と太陽風の相互作用に関してプラズマ物理的観点から粒子シミュレーション解析を精力的に行った。特に、電子も粒子として扱う全粒子モデルシミュレーションを用いて、磁場帆構造がイオン慣性長スケールから電子スケールに至るメソスケールにおける小型磁気圏形成現象に着目した。メソスケールでは、磁場帆による電子応答が重要であり、電子とイオンの運動差によって生じる局所的な分極電場によりイオンは影響を受ける。形成された電子スケール磁気圏の境界層構造やそこでの電流は電子が大きな役割を果たすことを初めて明らかにした。マルチスケール粒子シミュレーションによってより詳細な構造やプロセスを明ら

かにする必要がある。

また神戸チームでは、適合格子細分化法(AMR)を導入したマルチスケールプラズマ粒子シミュレーションコード **PARMER** を新規に開発し、細かい格子幅をもつ階層を生成させることにより局所的に高い空間解像度を持つ効率的なシミュレーションを可能とした。京コンピュータを用いた評価では、**PARMER** はコアカーネルの単体性能として 14%まで確認されており、負荷が高い粒子処理部分ルーチンを分割することでより高いピーク性能比が得られる可能性を明らかにした。またプロセス並列においては、動的領域分割法(DDD)を開発しそれを用いてプロセス間の負荷バランス維持も実現した。DDD を用いた大規模プロセス並列による高速演算を進めている。

#### 4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)  
研究課題の当初の目標は大きく次の二つである。

- (1) 衛星から磁場を発生させ、その磁場と太陽風からのプラズマによる宇宙航行のための推力を解析すること
- (2) 上記解析のための適合格子細分化法によるマルチスケール粒子シミュレーション手法を開発すること

(1)については、(2)のシミュレーションコードを用いて、詳細な分析を行い、宇宙航行のための推力につき実験では得られない解析結果を得ることができた。この推測の結果からは、宇宙航行のための十分な推力を得るのは難しいと思われるが、このような知見を得たことは、本研究課題の一つの目標を達成したと言える。また、第二の目標についても、手法として一通り完成している。但し、大規模・並列化という点で、その見込みは得られているが、今後の整備が望まれる。なお、マルチスケール問題としては、リコネクションを追えるかが重要だが、その点での有効性は十分には示されていない。

当初計画では想定されていなかった新たな展開として、本研究によって、宇宙航行のための十分な推力を得ることは難しい、ということが分かったことが挙げられる。これは、実システムとして研究開発を進めることに對し、現状の方法論を用いるだけでは不十分であることを示唆することになり、あまり望ましい展開ではない。したがって、本研究で得られた計算手法を活かす新たな分野を開拓する必要があるように思われる。望ましい展開としては、中間評価での指摘を受けて **AMR** を使った粒子シミュレーションでないと再現できないプラズマ現象の詳細解析の実行と、**AMR** プラズマシミュレーションコードの超大規模並列化チューニングの2点に対する取り組みが行われたことが挙げられる。特に後者では、本手法は一般に大規模並列化には向かない(負荷分散、あるいはポインターによる逐次処理)と言われていたが、詳細なチューニングの結果、大規模並列化の可能性があることが実証された。まだ道半ばであり、更なるチューニングが望まれるが、今後の発展を期待したい。

外部発表に関しては、原著論文が和文誌 6 件、欧文誌 30 件、解説記事が 4 件、国内会議と国際会議の招待講演がそれぞれ 4 件と 5 件で多いとは言えないが、妥当であろう。学会発表(口頭発表(国内会議 99 件、国際会議 51 件)、ポスター発表(国内会議 33 件、国際会議 20 件))は十分に行われたと評価できる。しかし、適用分野が国際的にもこのグループだけであることを考えると、国際学会での口頭発表及びポスター発表をもっと行って、国際的な評価を得るべきであったと感じる。

知的財産権の出願および活用に向けた取り組みについては、特許出願は研究戦略によるため一概に評価できないが、開発されたプログラム等についての公開等の方針を示してほしい。

研究の進め方については、大学だけでなく、実際の応用を想定した **JAXA** グループと組んで、解析の確認まで適切に研究を進めたと評価できる。特にポスドクの流動とプログラム開発の継続性に苦勞が見受けられるが、そのような環境下で良好な成果を導いたリーダーシップは評価されて良い。研究費は適切に執行されたと評価

できる。

#### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

研究成果の科学的・技術的インパクト、国内外の類似研究と比較したレベルや重要度に関しては、太陽風プラズマによる宇宙航行という課題そのものが、それが実現できれば、科学的・技術的に非常に大きなインパクトがある。しかし、本研究により、現実的な小型磁場を用いる場合、十分な推力を得るのはかなり困難であり、新しい工夫が必要であるという結果となった。ただ、そのような結果が得られたこと自体が、大きな成果であったということも出来よう。解析手法に関しては、動的な適応格子法である AMR 法の発想自体は新しいものではないが、各階層システムにおいてマクスウェル方程式を解き進めて電磁界更新を行うことで、静電的のみならず電磁的な物理現象にも対応できるようになり、より一般性を持った形でマルチスケールシミュレーションが可能となった。また、同手法で困難と思われた負荷バランス均一化による並列化に目途が付いているので、標準的な手法としてより一般化を図ることができれば、他の解析手段として使える可能性が大いにあると思われる。

戦略目標に向けての貢献、成果の社会的なインパクトの見通しとしては、マルチスケール・マルチフィジックスという観点では、特にここで開発された手法が、色々な解析に使われる可能性があるという点で、社会的なインパクトは十分であると評価できる。また、計算科学の宇宙開発への具体的応用例として、夢があり、一般にも理解しやすい。

今後、研究成果のさらなる展開が期待できるかについては、宇宙航行という応用では、JAXA あるいは海外の宇宙開発機関と組んで可能性を追求するという展開になれば、大きな展開がある可能性がある。しかし、今の段階では多くを期待できない。本手法の他の分野への適用に関しては、手法の標準化やライブラリーとして整備することにより、大きな展開が期待できる。

その他特記すべき事項としては、パーマネントな職でないポストドクの使い方に配慮があり、好感が持てる。

#### 4-3. 総合的評価

本研究のテーマである、太陽風プラズマによる宇宙航行システムの解析に関しては、得られた結果が実システムとしては否定的なものであったとは言え、ある程度の解析結果が得られたということ自体が、十分な成果であったと言える。世界的にみても本研究が唯一のものであり、得られた知見は貴重なものである。

本研究のもたらした研究成果は、学術的な側面においては、磁気モーメントと推力の関係を電子スケールからイオンスケール、さらにはMHDスケールまでを俯瞰する形で定量的に導き出したことである。もちろんそのための数値解析的技法を開発したことも評価できる。特に、推力を増大するためのプラズマ噴射による磁場帆展開において、その断面積を10倍も増やせることをシミュレーションで実証できたことは評価したい。

適合格子による粒子シミュレーションという手法についても、難しいと考えられていた大規模化・並列化に目途を付けたことは評価できる。今後、さらにこの手法の一般化を図ることによって、本手法が他の同様な解析分野に広く普及していくことを期待したい。

本研究は、具体的な宇宙開発分野に計算科学を応用した点、「京」への実装へ向けて努力が払われた点が評価できる。